

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.018

荷电液体射流破碎长度理论与实验*

王晓英 王军锋 支良泽

(江苏大学能源与动力工程学院, 镇江 212013)

摘要: 基于表面波线性不稳定性理论建立了荷电液体射流色散方程并进行数值计算,应用高速摄影技术测量荷电液体射流破碎长度,对理论分析结果进行实验验证。在讨论的射流速度、荷电电压范围内,随着射流速度或荷电电压的增加,0阶、1阶表面波最大增长率不断提高,但0阶表面波最大增长率始终大于1阶表面波,主导射流破碎过程;提高射流速度,射流破碎长度先增加至一个极值之后逐渐减小,荷电电压总是促进射流破碎,减小射流破碎长度;提高液体电导率,射流破碎长度增大。实验结果表明,线性不稳定性理论能很好地解释射流速度、荷电电压和液体电导率对射流破碎长度的影响,但在预测射流破碎长度极值对应的临界射流速度时存在一定的偏差。

关键词: 荷电射流 射流破碎长度 荷电电压 射流速度 电导率

中图分类号: O358 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)02-0093-04

Theory and Experiment on Jet Breakup Length of Charged Liquid

Wang Xiaoying Wang Junfeng Zhi Liangze

(School of Energy and Power Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Based on the linear instability theory, the dispersion equation of charged liquid jet was obtained. The charged liquid jet breakup length was measured by applying the high-speed photography technology to verify the theoretical results. The results of numerical calculation indicated that the growth rate of 0-order and 1-order surface wave grows with increasing of jet velocity and charged voltage. The maximum growth rate of 0-order surface wave was bigger than that of 1-order surface wave in the discussed range of jet velocity and charge voltage. The jet breakup length increased to maximum value and then decreased with increasing of jet velocity. Charge voltage always promoted the jet breakup and makes jet breakup length shorter. Higher liquid conductivity made jet breakup length longer. The experimental results showed that theoretical analysis gave a reasonable explanation to the influence of charge voltage, jet velocity and liquid conductivity on jet breakup length, but fails to be a good predictor of critical jet velocity corresponding to the maximum of jet breakup length.

Key words: Charged jet Jet breakup length Charge voltage Jet velocity Conductivity

引言

液体射流雾化技术在农药喷洒、卫生防疫等领域中已广泛应用,但由于其影响因素很多,液体射流雾化破碎机理至今尚不清楚。近年来,一些研究者通过数值模拟和实验方法发现,气液两相间的相互作用使射流表面形成了轴对称或非轴对称的表面

波,其中有些波长的表面波是不稳定的,随着时间或空间的发展而发展,最终导致液体射流破碎并形成一定尺度的液滴,喷嘴出口到射流破碎点的距离称之为射流破碎长度^[1~2]。万云霞等对非荷电射流破碎过程进行了实验研究,分析了射流速度对射流破碎长度的作用规律^[3~4]。荷电液体射流雾化由于电场的参与,其影响因素更加复杂,目前其雾化特性仍

收稿日期: 2011-12-31 修回日期: 2012-04-11

* 国家自然科学基金资助项目(51006047)、江苏省自然科学基金资助项目(BK2009705)和江苏大学高级人才科研启动基金资助项目(09JDC068)

作者简介: 王晓英,讲师,博士,主要从事荷电两相流理论及应用研究,E-mail: flair619@ujs.edu.cn

以实验研究为主,雾化机理有待进一步探索^[5~6]。汪朝晖等分别建立了荷电射流色散方程并进行了数值计算,分析了轴对称和非轴对称波形表面波的不稳定性^[7~8]。Bian Xiaoyan 通过数值计算系统地分析了非荷电与荷电情况下环形射流的不稳定性,分析了射流破碎长度和液滴粒径的影响因素^[9]。本文根据表面波线性不稳定性理论建立荷电液体射流色散方程并进行数值计算,分析射流速度、荷电电压及液体电导率对荷电液体射流破碎长度的影响,采用高速摄影技术观察测量荷电射流破碎形态及射流破碎长度,对理论分析结果进行验证。

1 理论分析与数值分析

1.1 色散方程

根据表面波理论,射流未受扰动时为圆柱形,半径为 a ,其速度分布为 $v_r = 0, v_\theta = 0, v_z = U$,发生扰动后射流表面表示为 $r = a + \eta = a + \eta_0 e^{\beta t + i(kz + n\theta)}$,其中 η 为射流受到的径向扰动, η_0 为径向扰动的初始振幅, β 为表面波增长率, $k = 2\pi/\lambda$ 表示 2π 长度上波长数,将 k 无量纲化,则无量纲波数 $\alpha = ak = 2\pi a/\lambda$,将 α 简称波数; n 表示表面波的阶数, $n = 0$ 是指 0 阶表面波,为轴对称波形, $n = 1$ 是指 1 阶表面波,为非轴对称波形; θ 表示圆射流的气液交界面波形两侧的相位差。速度记为 $v_r + v'_r, v_\theta + v'_\theta, v_z + v'_z, v' = \hat{v}(r) e^{\beta t + i(kz + n\theta)}$, v' 为扰动速度, $\hat{v}(r)$ 为扰动速度的初始振幅。压强为 $p + p'$, $p' = \hat{p}(r) e^{\beta t + i(kz + n\theta)}$, p' 为扰动压强, $\hat{p}(r)$ 为扰动压强的初始振幅。液体射流荷电电压记为 ϕ_0 ,射流周围是气体,以圆柱柱空间作为气相区域,并且 $R \gg a$ 。分析扰动压力场、扰动电场,根据荷电液体射流受力特性可得色散方程^[10]为

$$\beta^2 = \frac{\sigma I'_n(\alpha)}{\rho a^3 I_n(\alpha)} \alpha (1 - n^2 - \alpha^2) + \frac{U^2 \alpha^2}{a^2} - \frac{\phi_0^2 \varepsilon_0}{\rho a^4 \ln^2 \left(\frac{a}{R} \right)} \frac{I'_n(\alpha)}{I_n(\alpha)} \alpha \left[1 + \frac{K_n \left(\frac{R}{a} \alpha \right) I'_n(\alpha) - I_n \left(\frac{R}{a} \alpha \right) K'_n(\alpha)}{I_n(\alpha) K_n \left(\frac{R}{a} \alpha \right) - I_n \left(\frac{R}{a} \alpha \right) K_n(\alpha)} \right] \quad (1)$$

式中 $I_n(\alpha), I'_n \left(\frac{R}{a} \alpha \right)$ —— n 阶第 1 类修正贝塞尔函数

$K_n(\alpha), K_n \left(\frac{R}{a} \alpha \right)$ —— n 阶第 2 类修正贝塞尔函数

$I'_n(\alpha), I'_n \left(\frac{R}{a} \alpha \right)$ —— n 阶第 1 类修正贝塞尔函数的导数

$K'_n(\alpha), K'_n \left(\frac{R}{a} \alpha \right)$ —— n 阶第 2 类修正贝塞尔函数的导数

σ —— 液体表面张力

ρ —— 液体密度 ε_0 —— 介电常数

1.2 数值计算结果与分析

针形喷嘴射流未受扰动时的半径与针形喷嘴内半径相等,均为 a 。假设 $a = 0.3 \text{ mm}$,水的表面张力 $\sigma = 0.073 \text{ N/m}$ 、水的密度 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$ 、 $R/a = 100$,射流速度 $U = 0 \sim 1.2 \text{ m/s}$,荷电电压 $\phi_0 = 0 \sim 12 \text{ kV}$,进行数值计算。图 1 为荷电电压为 0 kV 和 3 kV 情况下表面波增长率与射流速度之间的关系。随着射流速度的增加,0 阶、1 阶表面波最大增长率 β_{\max} 、最优波数 α_{opt} 均随之增加,最优波长 λ_{opt} 减小,射流破碎形成的液滴尺寸随之减小,并且最大波数随速度增加而增加,最小波长减小。但是在讨论的射流速度范围内,0 阶表面波的最大增长率总是大于 1 阶表面波,0 阶表面波主导射流破碎过程。假设 0 阶表面波振幅达到针形喷嘴射流未受扰动时的半径 a 时,液体射流发生破碎,则射流破碎长度为

$$L = \frac{U}{\beta_{\max}} \ln \frac{a}{\eta_0} \quad (2)$$

由式(2)可知,对于确定的喷嘴来说,射流破碎长度取决于射流速度与表面波最大增长率的比值。

从图 1 可以看出,非荷电射流情况下,射流速度为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 和 1.2 m/s 时,0 阶表面波最大增长率为 757.7、1362.1、2461.1、4224.5、6922.8 和 10870.0 s^{-1} ,则射流速度与最大增长率的比值为 2.639×10^{-5} 、 2.937×10^{-5} 、 2.438×10^{-5} 、 1.893×10^{-5} 、 1.444×10^{-5} 和 $1.104 \times 10^{-5} \text{ m}$,随着射流速度的增加,射流破碎长度先增加至一个极值之后逐渐减小,这一变化趋势与文献[3]中低速射流区的实验测量结果一致。定义射流破碎长度极值对应的射流速度为临界射流速度,当射流速度小于该临界射流速度时为射流破碎长度增加区,反之则为射流破碎长度减小区。

当荷电电压为 3 kV,射流速度为 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 和 1.2 m/s 时,0 阶表面波最大增长率为 782.47、1418.5、2564.0、4389.0、7161.5 和 11187.0 s^{-1} ,射流速度与最大增长率的比值为 2.556×10^{-5} 、 2.820×10^{-5} 、 2.340×10^{-5} 、 1.823×10^{-5} 、 1.396×10^{-5} 和 $1.073 \times 10^{-5} \text{ m}$,射流破碎长度变化趋势与非荷电射流情况相同。理论预测的射流破碎长度极值对应的临界射流速度在 0.4 m/s 左右。

图 2 表示假设射流速度为 1 m/s,当荷电电压分别为 0、3、6、9、12 kV 时,0 阶表面波最大增长率逐渐

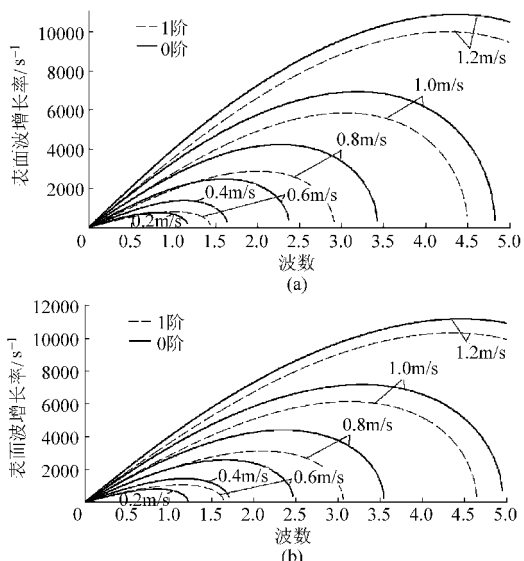


图1 射流速度对液体射流的影响
Fig.1 Effect of jet velocity on liquid jet
(a) 0 kV (b) 3 kV

增大,分别为 6 922.8、7 161.5、7 928.9、9 372.8、11 714.0 s^{-1} ,对应的最优波数亦随之增加,分别为 3.19、3.29、3.57、4.07、4.78,最优波长逐渐减小。1阶表面波最大增长率、最优波数的变化趋势与0阶表面波相同,并且随着荷电电压的增加,1阶表面波最大增长率虽然仍小于0阶表面波最大增长率,但两者之间的差值越来越小,1阶表面波对射流破碎的作用逐渐强化。因此,荷电电压的增加总是使圆柱射流不稳定性增加,表面波最大增长率增大,射流破碎长度减小。

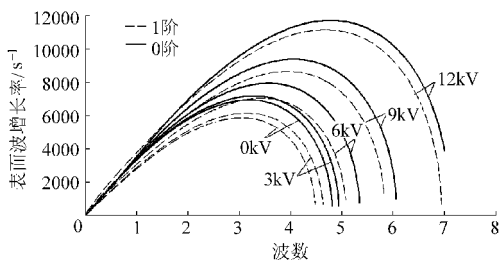


图2 荷电电压对液体射流的影响
Fig.2 Effect of charge voltage on liquid jet

2 实验

2.1 实验装置

实验系统如图3所示,由储液罐、针形喷嘴、高压静电发生器、直尺、LED光源、高速摄影仪和采集计算机组成。针形喷嘴内半径 a 为 0.3 mm,长径比为 50。工作介质为水,实验环境温度为 21℃,相对湿度为 61%,荷电方式采用接触式荷电,针形喷嘴与高压静电发生器直接用导线连接。调节储液罐与针形喷嘴出口的高度差控制针形喷嘴的流量,应用高速摄影仪拍摄射流破碎长度^[11]。流量用质量法

测量,用秒表记录时间 Δt ,采用精度为 0.000 1 g 高精度电子天平(FA1604型)测量针形喷嘴 Δt 时间内流出的液体质量 Δm ,则流量可记为 $q = \frac{\Delta m}{\Delta t}$,射流速度为 $U = \frac{q}{\pi a^2}$ 。高速摄影仪(MotionPro X4 plus型)采集频率为 10 kHz,光源为 LED 冷光源。为精确测量射流破碎长度,在针形喷嘴 10 cm 处竖直放置木质直尺,以便显示射流的破碎长度,并尽可能使直尺保持干燥,避免影响针形喷嘴附近静电场分布,进而影响荷电射流破碎过程。

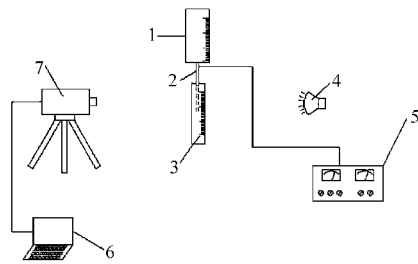


图3 实验示意图
Fig.3 Diagram of experimental devices

- 1. 储液罐 2. 针形喷嘴 3. 直尺 4. LED 光源 5. 高压静电发生器 6. 采集计算机 7. 高速摄影仪

2.2 实验结果与分析

在实验的射流速度、荷电电压范围内,液体呈柱状喷射而出,在毛细管出口形成锥状,液锥下有一段表面光滑的液柱,之后液柱表面出现波纹,经过一段距离以后液体散裂为细小的液滴,因此液体射流可分为锥形区、射流区、波纹区和液滴区,如图4所示。射流破碎长度 L 包含锥形区、射流区和波纹区的长度之和。射流破碎长度 L 、射流区长度、波纹区长度 L_b 均受到荷电电压、射流速度等因素的影响。

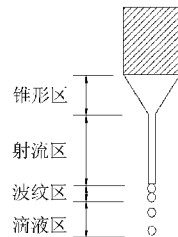


图4 锥射流模式简化图
Fig.4 Cone-jet model diagram

图5为不同射流速度时射流破碎长度与荷电电压的关系。在实验的射流速度范围内,不施加电压的情况下,射流需要很长的距离才会发生液体的散裂,形成的液滴粒径很大。施加电压后,射流破碎长度随电压的增加明显降低,液滴粒径也随之减小,这一实验结果与理论分析结果吻合。图6为不同射流速度时波纹区长度与荷电电压的关系。从图6可以看

出,在荷电射流过程中,波纹区不是始终都存在的,当荷电电压达到8~9 kV 甚至更高时,波纹区就观察不到了,锥射流雾化模式由射流区直接进入液滴区。

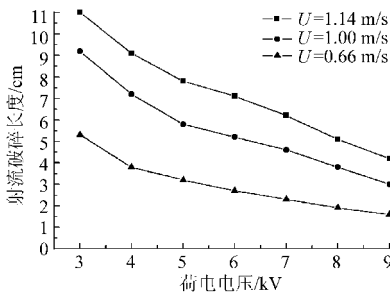


图5 射流破碎长度与荷电电压的关系曲线

Fig.5 Relationship between jet breakup length and charged voltage

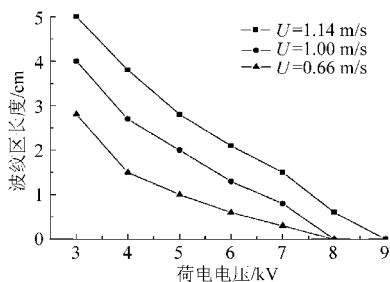


图6 波纹区长度与荷电电压的关系曲线

Fig.6 Relationship between corrugated region length and charged voltage

液体射流速度也是射流破碎长度的一个重要影响因素,在同样的荷电电压作用下提高射流速度,射流破碎长度随之增加,这一规律与文献[12]中非荷电射流情况一致。在实验的射流速度范围内,射流破碎长度随射流速度的增加而增加,当射流速度为1.14 m/s 时仍处于射流破碎长度增加区,射流破碎长度极值对应的临界射流速度比理论值大。

水的电导率 γ 为 0.28 mS/cm,在水中加入 NaCl 粒子,进一步提高液体的电导率。实验表明,电导率越大,射流破碎长度越长,如图7所示。在静电雾化中,荷质比(即液体荷电量与液体质量的比值)是衡量荷电效果的主要指标。一般认为电导率高的液体更容易荷上电荷,然而于辉等人在水中添加一定量

的离子提高液体电导率后,发现电导率高的液体的荷质比反而低^[12]。由此可以推知,提高液体的电导率,液体的荷电量并不能无限增加。当荷电液体离开高强度静电场区域后,电荷随时间不断衰减,其衰减速度与液体的电导率密切相关,电导率越大,电荷衰减越快,因此高电导率液体射流的荷质比反而低,实际带电电压更小,在相同的荷电电压、射流速度下,电导率高的液体射流破碎长度更长。

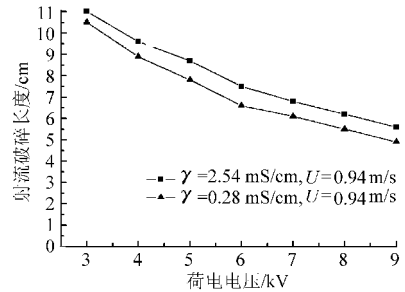


图7 不同电导率液体射流破碎长度与荷电电压的关系曲线

Fig.7 Relationship between jet breakup length and charged voltage within different liquid conductivities

3 结论

(1) 基于表面波线性不稳定性理论建立了荷电液体射流色散方程,通过数值分析发现:在讨论的射流速度、荷电电压范围内,随着射流速度、荷电电压的增加,0阶、1阶表面波最大增长率均随之增加,并且0阶表面波最大增长率始终大于1阶表面波,主导射流破碎过程。

(2) 低速射流情况下,提高荷电电压能增加液体射流的不稳定性,促进液体射流破碎,降低射流破碎长度;提高射流速度,射流破碎长度先增加至一个极值之后逐渐减小;在一定的电导率范围内,电导率高的液体射流破碎长度更长。

(3) 线性不稳定性理论能很好地解释荷电电压、射流速度、液体电导率对射流破碎长度的影响,但在预测射流破碎长度极值对应的临界射流速度时存在一定的偏差。

参 考 文 献

- 1 Uchiyama Y, Abe Y, Kaneko A, et al. Experimental study on influence of interfacial behavior on jet surface fragmentation[C]// Proceedings of the 17th International Conference on Nuclear Engineering, 2009, 4: 433~442.
- 2 Turn M R, Healey J J, Sazhin S S, et al. Stability analysis and breakup length calculations for steady planar liquid jets [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2011, 668: 384~411.
- 3 万云霞,黄勇,朱英. 液体圆柱射流破碎过程的试验[J]. 航空动力学报,2008, 23(2):208~214.
Wan Yunxia, Huang Yong, Zhu Ying. Experiment on the breakup process of free round liquid jet[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(2):208~214. (in Chinese)
- 4 Zhu Ying, Wan Yunxia, Huang Yong, et al. Study on the breakup lengths of free round liquid jets[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(8):1258~1263.

Chinese)

- 12 苏涛,王鹏新,刘翔舸,等. 基于熵值组合预测和多时相遥感的春玉米估产[J]. 农业机械学报,2011,42(1):186~192.
Su Tao, Wang Pengxin, Liu Xiangge, et al. Spring maize yield estimation based on combination of forecasting of entropy method and multi-temporal remotely sensed data[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(1):186~192. (in Chinese)
- 13 Box G E P, Jenkins G M. Time series analysis forecasting and control[M]. San Francisco: Holden Day, 1976.
- 14 Earnest A, Chen M I, Ng D, et al. Using autoregressive integrated moving average (ARIMA) models to predict and monitor the number of beds occupied during a SARS outbreak in a tertiary hospital in Singapore[J]. BMC Health Services Research, 2005, 5:36.
- 15 左志宇,毛罕平,张晓东,等. 基于时序分析法的温室温度预测模型[J]. 农业机械学报,2010,41(11):173~177,182.
Zuo Zhiyu, Mao Hanping, Zhang Xiaodong, et al. Forecast model of greenhouse temperature based on time series method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(11):173~177,182. (in Chinese)
- 16 Munoz-Tuduri M, Garcia-Moro C, Walker P L. Time series analysis of the epidemiological transition in Minorca, 1634~1997 [J]. Human Biology, 2006, 78(5): 619~634.
- 17 Han P, Wang P X, Zhang S Y, et al. Drought forecasting based on the remote sensing data using ARIMA models [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2010,51(11~12):1398~1403.
- 18 Shumway R H, Stoffer D S. An approach to time series smoothing and forecasting using the EM algorithm[J]. Journal of Time Series Analysis, 1982, 3(4):253~264.
- 19 张允,赵景波. 近200年来关中地区干旱灾害时空变化研究[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(7): 94~98.
Zhang Yun, Zhao Jingbo. Spacial-temporal changes of drought disaster in Guanzhong area in recent 200 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(7): 94~98. (in Chinese)

(上接第96页)

- 5 王贞涛,闻建龙,王晓英,等. 高压静电液体雾化技术[J]. 高电压技术,2008, 34(5):1067~1072.
Wang Zhentao, Wen Jianlong, Wang Xiaoying, et al. High voltage electrostatic spray [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5):1067~1072. (in Chinese)
- 6 王军锋,王泽,霍元平,等. 荷电电压、介质物性对静电雾化特征的影响[J]. 排灌机械工程学报,2012,30(4):469~472.
Wang Junfeng, Wang Ze, Huo Yuanping, et al. Effects of liquid properties on electrostatic spray characteristics[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(4): 469~472. (in Chinese)
- 7 汪朝晖,廖振方. 针板电极荷电液体射流不稳定性分析[J]. 农业机械学报,2009, 40(8):86~91.
Wang Zhaohui, Liao Zhenfang. Analysis of instability for charged liquid jets with the needle-plate electrode [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(8): 86~91. (in Chinese)
- 8 Li Fang, Yin Xieyuan, Yin Xiezheng. Temporal linear instability analysis of an electrified coaxial jet with inner driving liquid inside a coaxial electrode[J]. Journal of Electrostatics, 2006, 64(10): 690~698.
- 9 Bian Xiaoyan. Towards simulation of charging and breakup in electrostatic atomizers[D]. Chicago: University of Illinois, 2008.
- 10 王晓英. 荷电液体雾化的研究及应用[D]. 镇江:江苏大学,2008.
Wang Xiaoying. The research and application of charged atomization[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2008. (in Chinese)
- 11 Phan C M, Evans G M. Influence of jet velocity on jet breakup in immiscible liquid-liquid systems[C]//Chemeca 2008: Towards a Sustainable Australasia; Newcastle, N. S. W, 2008: 1087~1095.
- 12 李龙飞,池保华,杨伟东,等. 真空环境下液体射流雾化特性的实验研究[J]. 火箭推进,2010, 35(5): 27~30.
Li Longfei, Chi Baohua, Yang Weidong, et al. Experimental study on atomization characteristic of liquid jet in vacuum environment[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2010, 35(5): 27~30. (in Chinese)
- 13 于辉,何雄奎,仲崇山,等. 在喷雾中喷雾雾化特性对荷质比的影响[J]. 安徽农业科学,2007,35(15):4706~4707.
Yu Hui, He Xiongkui, Zhong Chongshan, et al. Effect of the liquid properties of electrostatic spraying on charge-mass ration[J]. Journal of Anhui Agriculture Science, 2007, 35(15):4706~4707. (in Chinese)
- 14 王晓英,王军锋. 荷电黏性液体射流线性不稳定性分析[J]. 排灌机械工程学报,2012, 30(2): 225~230.
Wang Xiaoying, Wang Junfeng. Linear stability analysis for charged viscid liquid jets[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(2): 225~230. (in Chinese)
- 15 康灿,杨敏官,张峰,等. 圆柱水射流中的能量分布与统计特征[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(2):160~164.
Kang Can, Yang Minguan, Zhang Feng, et al. Energy distribution and statistic characteristics in round water jet[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011,29(2):160~164. (in Chinese)
- 16 王贞涛,罗愷乾,岑旗钢. 荷电喷雾两相流场的试验[J]. 排灌机械工程学报,2010,28(1):68~72.
Wang Zhentao, Luo Tiqian, Cen Qigang. Experiment on electrostatic spray two-phase flow[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010,28(1): 68~72. (in Chinese)